

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАТИВНОСТИ ТРЕХОПОРНОГО ПОРТАЛА НА ПОСТРОЕНИЕ ГРУЗОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРЕЛОВОГО РЕЛЬСОВОГО КРАНА ТИПА СКР

Татьяна Васильевна Луцко¹, Дмитрий Владимирович Русанов²,
Руслан Александрович Вершинин³

^{1,2,3} Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия

¹t.v.lutsko@donnasa.ru, ²rusanov.d.v-zptm-53b@donnasa.ru, ³vershinin.r.a-ptm-37a@donnasa.ru

Аннотация. В статье проанализировано напряженно-деформированное состояние трехопорного портала стрелового рельсового крана СКР-3500 ЭМ с использованием программного комплекса SCAD Office. На точность позиционирования груза на место монтажа влияет податливость конструкции тяжелых стреловых кранов типа СКР, которые отличаются большой зоной обслуживания. В частности, свой вклад в общую деформативность крана СКР-3500 ЭМ вносит податливость его ходовой части, выполненной в виде трехопорного портала на рельскокошечном ходу. Вследствие чего, происходит наклон башенно-стрелового оборудования в сторону поднимаемого груза и имеет место выход за пределы грузовой характеристики крана, в особенности при подъеме максимального груза. В статье проведена оценка влияния податливости трехопорного портала на возникновение приращений вылета стрелы и разработаны рекомендации по усилению металлоконструкции портала с целью снижения его деформативности.

Ключевые слова: вылет, грузовая характеристика, деформативность, напряженно-деформированное состояние, портал, приращение, стреловой кран рельсовый

Для цитирования: Луцко Т. В., Русанов Д. В., Вершинин Р. А. Влияние деформативности трехопорного портала на построение грузовой характеристики стрелового рельсового крана типа СКР // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2024. Выпуск 2024-6(170) Технология, организация, механизация и геодезическое обеспечение строительства. С. 74–84. doi: 10.71536/vd.2024.6c170.9. edn: hnwzym.

Original article

THE INFLUENCE OF THE DEFORMABILITY OF THE TRICYCLE PORTAL ON THE CONSTRUCTION OF THE CARGO CHARACTERISTICS OF A JIB RAIL CRANE OF THE SKR TYPE

Tatyana V. Lutsko¹, Dmitry V. Rusanov², Ruslan A. Vershinin³

^{1,2,3} Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia

¹t.v.lutsko@donnasa.ru, ²rusanov.d.v-zptm-53b@donnasa.ru, ³vershinin.r.a-ptm-37a@donnasa.ru

Abstract. The article analyzes the stress-strain state of the three-support portal of the jib rail crane SKR-3500 EM using the SCAD Office software package. The accuracy of positioning the load at the installation site is influenced by the malleability of the design of heavy jib cranes of the SKR type, which are characterized by a large service area. In particular, the malleability of its undercarriage, made in the form of a tricycle portal on a rail-wheeled course, contributes to the overall deformability of the SKR-3500 EM crane. As a result, the tower boom equipment is tilted towards the load being lifted and there is an outflow beyond the load characteristics of the crane, especially when lifting the maximum load. The article evaluates the influence of the malleability of a tricycle portal on the occurrence of boom departure increments and develops recommendations for strengthening the metal structure of the portal in order to reduce its deformability.



Keywords: departure, cargo characteristics, deformability, stress-strain state, portal, increment, boom crane rail

For citation: Lutsko T. V., Rusanov D. V., Vershinin R. A. The influence of the deformability of the tricycle portal on the construction of the cargo characteristics of a jib rail crane of the SKR type. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Technology, organization, mechanization and geodetic support of construction*. 2024;6(170):74–84. (In Russ.). doi: 10.71536/vd.2024.6c170.9. edn: hnwzym.

ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

Для стреловых рельсовых кранов типа СКР характерна повышенная деформативность, которая приводит к приращениям вылетов крана при подъеме грузов [1, 2]. В частности, в кране СКР-3500 ЭМ эти приращения могут достигать 5,5 м при подъеме максимального груза 100 т. Доля влияния деформативности башенно-стрелового оборудования составляет 53 %, деформативности портала 36 % в общей деформативности крана [1]. В связи с этим, исследование напряженно-деформированного состояния портала, на котором установлен стреловой рельсовый кран является актуальным.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Данная проблематика рассматривалась в работах [1, 3]. В результате этих исследований рекомендовалась установка крана на четырехопорный портал, вследствие чего происходит снижение приращений вылета на 40 % [1]. Однако это приводит к повышению общей массы крана. В настоящей статье рассматривается трехопорный портал с некоторыми изменениями в конструкции, что также приведет к снижению приращений вылета, но без существенного утяжеления конструкции.

Целью настоящего исследования является снижение деформативности трехопорного портала с последующей корректировкой грузовой характеристики стрелового рельсового крана типа СКР.

Задачами являются:

1. Исследование напряженно-деформированного состояния трехопорного портала крана СКР-3500 ЭМ в двух исполнениях: базовом и новом (с учетом дополнительных элементов усиления в металлоконструкции портала).
2. Определение высоты продольных балок верхнего строения трехопорного портала, обеспечивающей их минимальный вес.
3. Разработка рекомендаций по построению грузовой характеристики крана типа СКР, учитывающей податливость портала.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

В качестве объекта исследования принимаем трехопорный портал крана СКР-3500ЭМ, схема которого с габаритными размерами и указанием основных узлов представлена на рисунке 1. Две опоры портала жесткие, а третья отдельно стоящая опора гибкая. Максимальная грузоподъемность крана в башенно-стреловом исполнении 100 т на вылете 27 м, максимальная высота основного подъема груза 134 м. В настоящем рассмотрении влияние вспомогательного подъема не анализируем.

Предлагается усилить конструкцию трехопорного портала, схема нового исполнения показана на рисунке 2. Для уменьшения деформативности портала предлагается установить дополнительно поперечную балку в верхнем строении (элемент 38-39 на рисунке 2) и односторонние продольные ребра в балках верхнего строения на участках 6-38 и 7-39 (рисунок 2 и рисунок 3, б). Поперечные сечения балок верхнего строения и опор портала в базовом и новом исполнениях показаны на рисунке 3.

Приведенная гибкость продольных балок составляет $\bar{\lambda}_W = 2,9$, следовательно, поперечные ребра жесткости по расчету не нужны при отсутствии подвижной нагрузки. Тем не менее, кран работает при переменных нагрузках, а также с учетом того, что у него возникают инерционные нагрузки от поворота стрелы с грузом, конструктивно назначаем поперечные ребра жесткости с шагом не более $a \leq 2,5h$ при $\bar{\lambda}_W \leq 3,2$ [4]. В рассматриваемом портале поперечные ребра установлены с шагом

$$a = 1,5h_c = 1,5 \cdot 2,135 = 3,2 \text{ м } (h_c - \text{высота стенки балки}).$$

Известно, что жесткость рамных четырехопорных порталов порталных кранов на колонне с крестообразным ригелем грузоподъемностью 80 т составляет $c = 25$ кН/мм [5]. Для рассматриваемого трехопорного

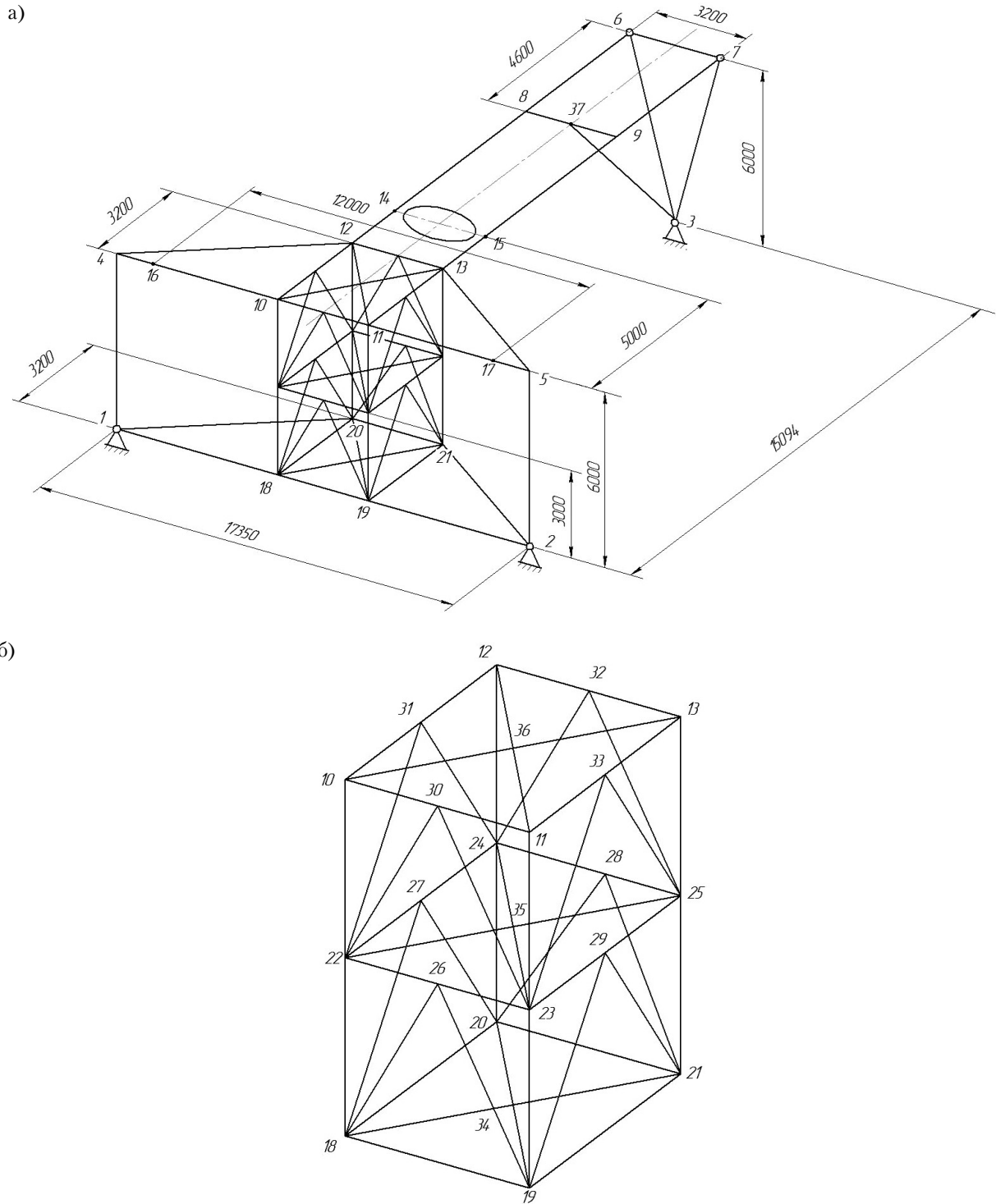


Рисунок 1 – Схема трехопорного портала в базовом исполнении (а) и его тумбы (б) с указанием нумерации узлов.

портала определили его жесткость, которая в базовом исполнении составила $c_b = 31$ кН/мм, а в новом исполнении – $c_H = 32,2$ кН/мм.

При этом необходимый момент инерции сечения продольного ребра жесткости, расположенного с одной стороны стенки балки, определялся в зависимости от величины b_1/h_C (где b_1 – расстояние по вертикали между верхним поясом и продольным ребром (рисунок 3, б расстояние 550 мм)):

$$(1,5 - 0,4a/h_C)a^2\delta^3 h_C \leq J_P \leq 3,5h_C\delta^3, \quad (1)$$

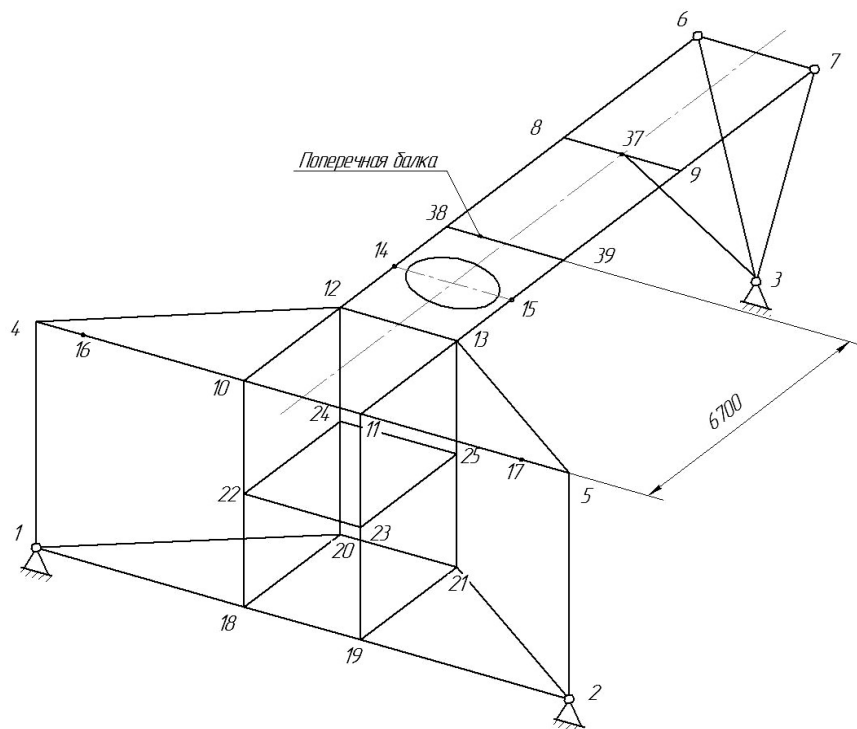
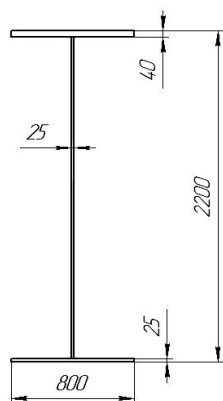
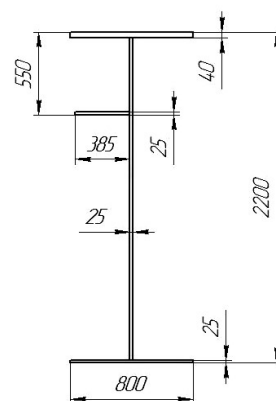


Рисунок 2 – Схема трехопорного портала в новом исполнении (на схеме стержни тумбы не показаны).

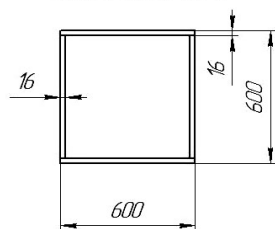
а) Сечение балок 10-6, 11-7, 8-9



б) Сечение балок 6-38, 7-39



в) Сечение опор 1-4, 2-5



Сечение стоек треугольной опоры 3-6, 3-7

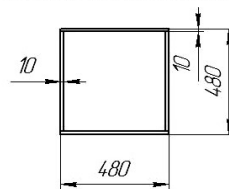


Рисунок 3 – Схема поперечных сечений в элементах портала: а) балки верхнего строения базового исполнения; б) балки верхнего строения нового исполнения; в) стойки опор портала.

где δ – толщина стенки, мм.

В качестве нагружения принимали:
– вес крана $G = 6\,790$ кН;

- вес поворотной части крана с грузом $G_1 = 6\,367$ кН;
- вес неповоротной (ходовой) части крана $G_2 = 1\,423$ кН;
- вес груза $Q \approx 1\,000$ кН;
- ветровая нагрузка, действующая на кран $W_{в.кр} = 30,4$ кН;
- ветровая нагрузка, действующая на груз $W_{в.гр} = 14$ кН.

Учитывали два случая:

I – все опоры крана неподвижные;

II – ходовая тележка одиночной третьей опоры расторможена.

При расположении плоскости стрелы перпендикулярно рельсам и изменении угла поворота стрелы $\alpha = 180^\circ$ (без груза) и $\alpha = 0^\circ$ (с грузом) (рисунок 4) определяем опорные реакции трехопорного портала по формулам, кН:

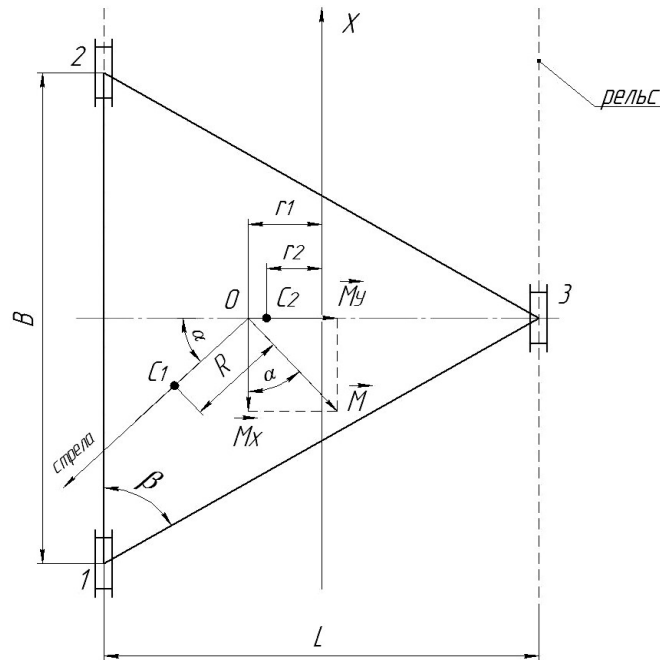


Рисунок 4 – Расчетная схема рамы трехопорного портала для определения вертикальных нагрузок.

$$\begin{cases} R_1 = \frac{1}{4} G_1 \cdot \left(1 + \frac{2r_1}{L}\right) + \frac{1}{4} G_2 \cdot \left(1 + \frac{2r_2}{L}\right) + \frac{M}{B} \cdot \sin \alpha + \frac{M}{2L} \cdot \cos \alpha; \\ R_2 = \frac{1}{4} G_1 \cdot \left(1 + \frac{2r_1}{L}\right) + \frac{1}{4} G_2 \cdot \left(1 + \frac{2r_2}{L}\right) - \frac{M}{B} \cdot \sin \alpha + \frac{M}{2L} \cdot \cos \alpha; \\ R_3 = \frac{1}{2} G_1 \cdot \left(1 - \frac{2r_1}{L}\right) + \frac{1}{2} G_2 \cdot \left(1 - \frac{2r_2}{L}\right) - \frac{M}{L} \cdot \cos \alpha. \end{cases} \quad (2)$$

- где L и B – соответственно колея и база портала, м;
 r_1 и r_2 – расстояния от середины колеи до центров тяжести соответственно поворотной части крана с грузом G_1 и неповоротной части крана G_2 , м;
 M – момент горизонтальных сил, вызываемых ветровой нагрузкой, отклонением канатов от вертикали, горизонтальными силами инерции, уклоном пути, кН·м.

Исходя из условия для реакции i -той опоры, кН:

$$R_i = c \delta_i \quad (3)$$

- где c – жесткость портала, кН/м;
 δ_i – перемещения i -той опоры, м.

Таблица 1 – Результаты расчета перемещений опор портала вдоль пути при расположении плоскости стрелы перпендикулярно рельсам

Наименование показателей	Значения, м			
	базовое исполнение		новое исполнение	
	без груза	с грузом	без груза	с грузом
перемещение опоры 1 δ_1	0,053	0,103	0,05	0,097
перемещение опоры 2 δ_2	0,053	0,103	0,05	0,097
перемещение опоры 3 δ_3	0,124	0,045	0,111	0,048

Определим деформации в опорных точках (результаты расчета приведены в таблице 1).

Результаты расчета перемещений опор показали, что максимальное перемещение характерно для третьей одиночной опоры. При переходе на новое исполнение портала перемещения опор снизились на 5...10,5 % (меньшие значения относятся к опорам 1 и 2, а большие к одиночной опоре 3).

Графически отложив углы поворота портала с грузом и без груза находим точку O_1 . Она располагается по горизонтали от оси вращения на расстоянии для базового исполнения $l = 2$ м (рисунок 5, а), для нового исполнения $l = 1,8$ м. Определяем угол поворота портала и находим приращение вылета, вызванное перемещениями опор портала (рисунок 5, б). Результаты расчета приращений вылета маневровой стрелы крана представлены в таблице 2.

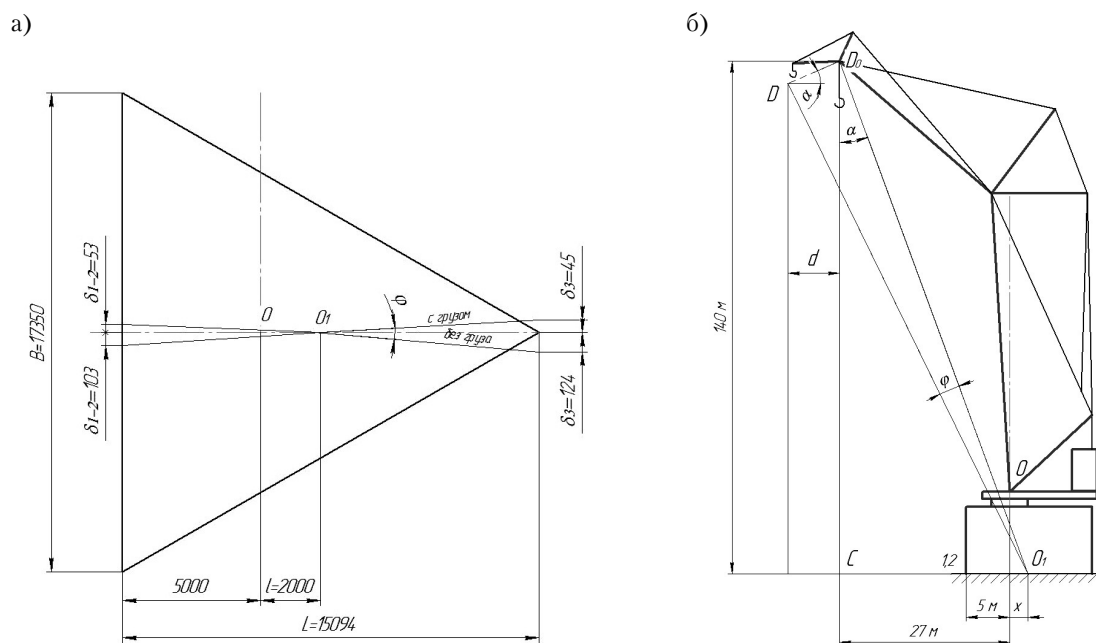


Рисунок 5 – Схемы к определению приращений вылета маневровой стрелы: а) схема поворота портала от перемещений его опор; б) схема определения приращения вылета стрелы от поворота портала, вызванного перемещениями его опор.

Таблица 2 – Результаты расчета приращений вылета маневровой стрелы, вызванных поворотом портала из-за перемещений его опор

Наименование показателей	Значения, м	
	базовое исполнение	новое исполнение
Угол поворота портала φ , град	0,49	0,41
Приращение вылета d , м	1,216	1,007

Перемещение оголовка маневровой стрелы (то есть приращение вылета стрелы) определяется по формуле, м:

$$d = D_0 D \cos \alpha, \tag{4}$$

где $D_0 D = O_1 D_0 \cdot \varphi$ – дуга окружности, описываемая оголовком маневровой стрелы, м;
 α – угол в треугольнике $D_0 C O_1$ (рисунок 5, б), град.

Таким образом, при переходе на новое исполнение портала снижение приращений вылета, вызванное поворотом портала из-за перемещений его опор, составило 17 %.

При применении нового исполнения портала с дополнительными ребрами жесткости его вес увеличился на 2 %, то есть на 3 т. В связи с этим была поставлена задача определения высоты балок верхнего строения, обеспечивающей их минимальный вес.

Оптимальная высота двутавровой балки верхнего строения портала:
 – базового исполнения

$$h \leq \sqrt{\frac{2W}{\delta \left(\beta - \frac{1}{3} \right)}}; \quad (5)$$

– нового исполнения с продольным ребром

$$h \leq \sqrt{\frac{2W}{\delta \left(\frac{2,725}{2,6} \beta - \frac{1}{3} \right)}}; \quad (6)$$

где W – момент сопротивления сечения балки, м³;
 δ – толщина стенки, м;
 β – конструктивный коэффициент, зависящий от веса диафрагм и ребер жесткости. В среднем при отсутствии продольных ребер $\beta = 1,2$ и при наличии одной пары продольных ребер $\beta = 1,3$ [6].

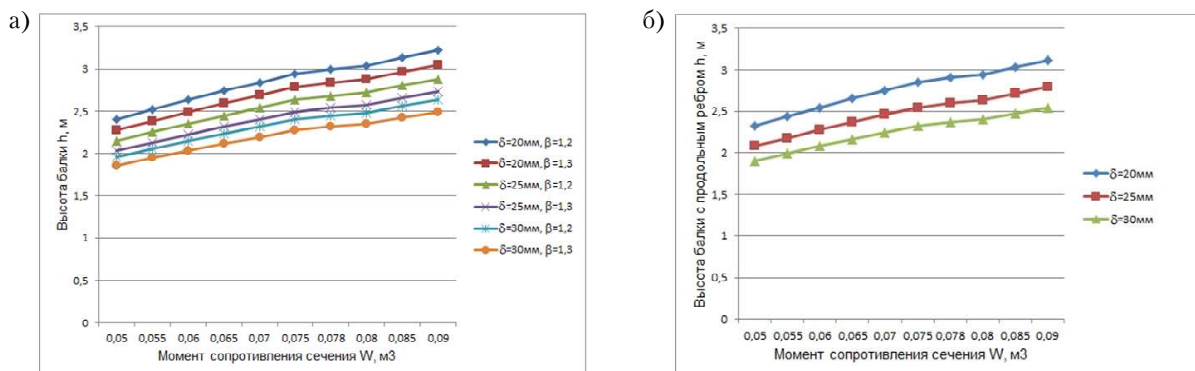


Рисунок 6 – Графики высот балок, обеспечивающих их минимальный вес: а) для двутавровой балки; б) для двутавровой балки с продольным ребром.

В соответствии с формулами оптимальной высоты балки (5) и (6) построили графики зависимости высоты балки, представленные на рисунке 6.

Анализ графиков показал, что:

1) с увеличением толщины стенки на 17...20 % оптимальная высота балки уменьшается соответственно на 9...10,5 %;

2) при наличии ребра жесткости оптимальная высота уменьшается на 5,3 %;

3) при расчетном моменте сопротивления сечения W , м³, для балки базовой модели $W = 0,078$ м³ высота балки составляет по графику 2,683 м при толщине стенки 25 мм, а для новой балки $W = 0,081$ м³ высота балки составляет по графику 2,631 м при толщине стенки 25 мм. В рассматриваемых исполнениях портала высота балки 2,2 м, что удовлетворяет требованиям минимального веса.

Погонный вес балок верхнего строения, исходя из оптимальной высоты балки, кН:

– базового исполнения

$$G_{BT} = 2\gamma h \delta \left(\beta - \frac{1}{3} \right); \quad (7)$$

– нового исполнения с продольным ребром

$$G = 2\gamma h \delta \left(\beta - \frac{2,6}{8,175} \right). \quad (8)$$

На основании полученных данных определена погонная масса базового и нового порталов. Результаты показывают незначительное увеличение веса нового исполнения портала, как было сказано выше, не более 2 %.

Далее выполнено моделирование исполнений трехопорного портала в программе SCAD Office и проведен численный анализ напряженно-деформированного состояния порталов.

Расчет выполнялся при расположении стрелы вдоль рельсового пути при всех неподвижных опорах и при расторможенной ходовой тележке одиночной опоры. На рисунке 7 представлены результаты расчета моментов, возникающих в элементах исполнений трехопорного портала крана СКР-3500 ЭМ при расторможенной тележке одиночной опоры. На рисунке 8 показаны гистограммы наибольших напряжений, возникающих в балках верхнего строения исполнений портала. Запас прочности базового портала составил 1,5, а нового портала – 1,7.

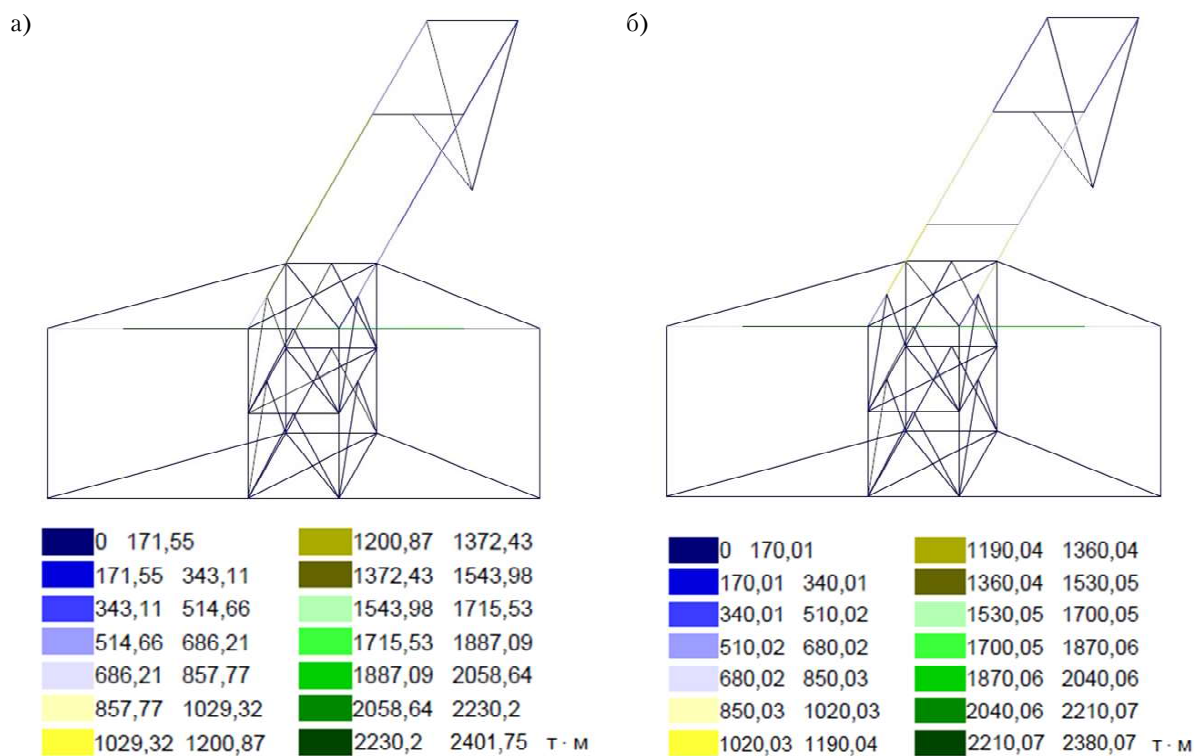


Рисунок 7 – Схемы исполнений трехопорного портала с указанием изгибающих моментов (т м) в стержнях при расторможенной тележке одиночной опоры: а) базовое исполнение; б) новое исполнение.

На рисунке 9 показана гистограмма приращений вылета, вызванного деформативностью исполнений портала, согласно которой снижение приращений вылета при переходе на новый портал составило 16 %.

На рисунке 10 показаны скорректированные грузовые характеристики основного подъема груза крана СКР-3500 ЭМ, учитывающие приращения вылета при подъеме груза с установкой на базовый и новый порталы. Приращения вылета принимались наибольшие, то есть данные из таблицы 2. В результате по скорректированным характеристикам можно настроить ограничитель грузоподъемности и указатель вылета.



Рисунок 8 – Гистограмма максимальных напряжений в балках верхнего строения трехопорного портала (БТ – базовое исполнение, НТ – новое исполнение).

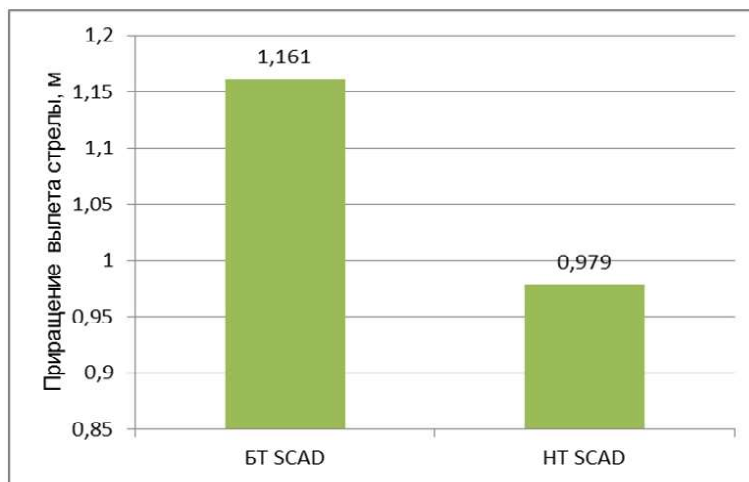


Рисунок 9 – Гистограмма приращений вылета маневровой стрелы, вызванных податливостью портала крана СКР-3500 ЭМ, по результатам моделирования в SCAD Office.

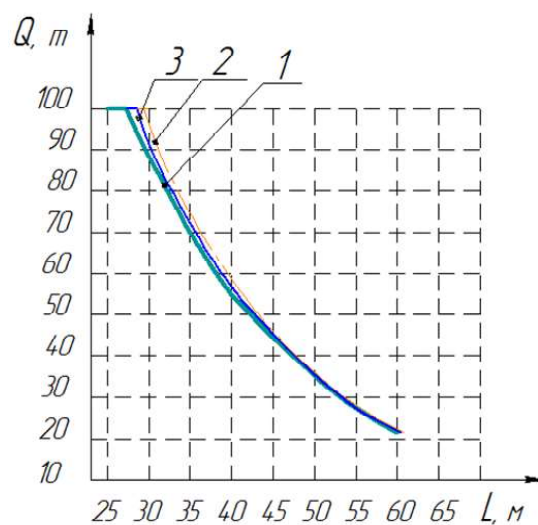


Рисунок 10 – Грузовые характеристики основного подъема груза крана СКР-3500 ЭМ: 1 – паспортная; 2 – скорректированная с учетом деформативности базового портала; 3 – скорректированная с учетом деформативности нового портала.

ВЫВОДЫ

1. Рекомендуется применение нового исполнения трехопорного портала крана СКР-3500 ЭМ с дополнительными элементами усиления в виде поперечной балки и продольных ребер в балках верхнего строения портала. Снижение приращений вылета стрелы, вызванные деформативностью нового портала по сравнению с податливостью базового портала, составляют 16 % при расположении стрелы вдоль пути и 17 % при расположении стрелы поперек пути.

2. Определены зависимости высоты продольных балок верхнего строения трехопорного портала, обеспечивающие их минимальный вес для базового и нового портала.

3. Рекомендуется при построении грузовой характеристики кранов типа СКР учитывать податливость портала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Луцко, Т. В. Обоснование параметров тяжелых стреловых рельсовых кранов типа СКР с повышенной точностью позиционирования грузов : специальность 05.05.05 «Подъемно-транспортные машины» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Луцко Татьяна Васильевна, Донбасская национальная академия строительства и архитектуры. – Макеевка, 2004. – 24 с. – Место защиты: Одесский национальный политехнический университет. – Текст : непосредственный.
2. Соколова, А. Д. Подъемно-транспортное и такелажное оборудование для монтажа строительных конструкций : учебник для техникумов / А. Д. Соколова, В. С. Визильтер. – 5-е изд., перераб. и доп. – Москва : Стройиздат, 1987. – 332 с. – Текст : непосредственный.
3. Моделирование податливости опорной металлоконструкции тяжелых стреловых рельсовых кранов типа СКР при вариации режима нагружения / Т. В. Луцко, А. Г. Лукьянец, В. П. Мельник [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник Донбасской государственной академии строительства и архитектуры. – 2000. – Выпуск 2000-5(25) Строительные, дорожные машины и оборудование. – С. 66–69.
4. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 27 февраля 2017 г. № 126/пр : актуализированная редакция СНиП II-23-81* (с Поправкой, с Изменениями N 1, 2) : дата введения 2017-08-28 / подготовлен Департаментом градостроительной деятельности и архитектуры Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России). – Москва : Стандартинформ, 2019. – 147 с. – Текст : непосредственный.
5. Справочник по кранам : в 2 томах. Том 1. Характеристики материалов и нагрузок. Основы расчета кранов, их приводов и металлических конструкций / В. И. Брауде, М. М. Гохберг, И. Е. Звягин [и др.] ; под общей редакцией М. М. Гохберга. – Москва : Машиностроение, 1988. – 536 с. : ил. – ISBN 5-217-00288-3. – Текст : непосредственный.
6. Гохберг, М. М. Металлические конструкции подъемно-транспортных машин / М. М. Гохберг. – Ленинград : Машиностроение, 1976. – 454 с. – Текст : непосредственный.

Информация об авторе

Луцко Татьяна Васильевна – кандидат технических наук, доцент кафедры наземных транспортно-технологических комплексов и средств Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: статика и динамика грузоподъемных кранов.

Русанов Дмитрий Владимирович – магистрант кафедры наземных транспортно-технологических комплексов и средств Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: исследование напряженно-деформированного состояния металлоконструкций грузоподъемных кранов.

Вершинин Руслан Александрович – магистрант кафедры наземных транспортно-технологических комплексов и средств Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: исследование напряженно-деформированного состояния металлоконструкций грузоподъемных кранов.

Information about the author

Lutsko Tatyana V. – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Land Transport and Technological Complexes and Facilities Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: statics and dynamics of lifting cranes.

Rusanov Dmitriy V. – master's student, Land Transport and Technological Complexes and Facilities Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: investigation of the stress-strain state of metal structures of lifting cranes.

Vershinin Ruslan A. – graduate student, Land Transport and Technological Complexes and Facilities Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: investigation of the stress-strain state of metal structures of lifting cranes.

Статья поступила в редакцию 25.10.2024; одобрена после рецензирования 22.11.2024; принята к публикации 29.11.2024.

The article was submitted 25.10.2024; approved after reviewing 22.11.2024; accepted for publication 29.11.2024.